ДОКЛАДЫ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК. НАУКИ О ЗЕМЛЕ, 2023, том 513, № 2, с. 284–288

ГЕОГРАФИЯ

УДК 631.43

ПРИРОДА СВЯЗЕЙ В ФОРМИРОВАНИИ ВОДОУСТОЙЧИВОСТИ ПОЧВЕННЫХ АГРЕГАТОВ

© 2023 г. Г. Н. Федотов[1,*], член-корреспондент РАН С. А. Шоба[1], Д. А. Ушкова[1], И. В. Горепекин[1], А. П. Шваров[1]

Поступило 21.06.2023 г.
После доработки 01.08.2023 г.
Принято к публикации 04.08.2023 г.

Существует мнение, что водоустойчивость обусловлена гидрофобными связями между органическими почвенными частицами, однако есть работы, в которых основная роль в возникновении этого свойства отводится наличию в почвах гидрофильных органических веществ. Целью исследования являлось выяснение природы связей (гидрофильные или гидрофобные), обеспечивающих водоустойчивость почв. В работе использовали образцы агродерново-подзолистой и серой лесной почвы, а также чернозема выщелоченного. Эксперименты по оценке водоустойчивости проводили методом "лезвий". Он основан на рассечении линейно расположенных агрегатов, которые предварительно увлажняли в вакууме до значений, близких к насыщению. Энергия гидрофобных связей зависит от температуры, поэтому было изучено влияние температуры на величину определяемой водоустойчивости. Эксперименты показали, что при повышении температуры водоустойчивость агрегатов, сохраненных во влажном состоянии с момента отбора, возрастала, а при уменьшении – убывала. Это говорит о ведущей роли гидрофобных связей в формировании водоустойчивости. Для образцов, высушенных до воздушно-сухого состояния, снова увлажненных и выдержанных во влажном состоянии больше 2 нед, температурной зависимости водоустойчивости обнаружено не было. Принимая во внимание, что прочность гидрофобных связей при повышении температуры растет, а гидрофильных связей снижается, полученные данные о неизменности величин водоустойчивости можно объяснить, если предположить совместное участие в водоустойчивости образцов почв, прошедших через стадию высушивания до воздушно-сухого состояния, как гидрофобных, так и гидрофильных связей. Фактически эти результаты свидетельствуют о сильном изменении структурной организации почв при высушивании.

Ключевые слова: водоустойчивость и органическое вещество почв, гидрофильные и гидрофобные связи, влияние температуры на водоустойчивость

DOI: 10.31857/S2686739723601357, **EDN:** XNSMPC

Наличие агрономически ценной структуры почвы придает ей ряд важных производственных свойств: оптимальную плотность, облегчающую прорастание семян и развитие из них растений [1], благоприятный для развития растений водно-воздушный и тепловой режимы [2, 3]. Однако само наличие структуры почвы определяется ее водоустойчивостью – количеством и прочностью внутриагрегатных связей [4], обеспечивающих существование почвенных агрегатов.

Установлено [4, 5], что агрегатный состав почв и водоустойчивость агрегатов определяются органическим веществом почв, но до сих пор не существует удовлетворительной гипотезы, объясняющей механизмы этой взаимосвязи.

Существует мнение [6], что водоустойчивость почв обусловлена количеством (плотностью) гидрофобных связей, существующих между почвенными частицами. Согласно предложенному в работах [7, 8] механизму, гидрофильные участки гуминовых веществ (ГВ) взаимодействуют с глинистыми минералами, а гидрофобные участки взаимодействуют друг с другом, связывая почвенные частицы в агрегате и обеспечивая водоустойчивость.

Существует и другое мнение [9, 10] о механизме формирования водоустойчивых агрегатов – в наиболее агрегированных почвах содержание гидрофильных компонентов ГВ повышено.

Таким образом, на данный момент отсутствуют единые представления о типе связей, формирующих водоустойчивость.

[1]*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия*
**e-mail: gennadiy.fedotov@gmail.com*

Целью исследования являлось выяснение природы связей (гидрофильные или гидрофобные), обеспечивающих водоустойчивость почв.

Решение этой задачи было реализовано путем изучения влияния температуры на изменение водоустойчивости почвенных агрегатов. Этот метод был выбран из-за хорошо известного факта снижения прочности гидрофильных связей при повышении температуры и повышения прочности при этом гидрофобных связей [6, 11].

В работе использовали агродерново-подзолистую почву (Московская область), серую лесную почву (Тульская область) и чернозем выщелоченный (Орловская область).

Изучали образцы естественной влажности (0.7–0.8 полевой влагоемкости). После отбора в поле образцы помещали в закрывающиеся контейнеры. Для предотвращения потери воды контейнеры располагали в пакетах, где поддерживали влажность, близкую к 100%. Пакеты с емкостями хранили при температуре 25°C. Также в работе использовали эти же образцы, которые высушили до воздушно-сухого состояния, затем увлажнили до 0.7–0.8 полевой влагоемкости и выдержали при этой влажности не менее 2 нед.

В ходе исследования применяли метод “лезвий”, основанный на рассечении близких к насыщению водой агрегатов лезвием и определении предельного напряжения их разрушения [12]. При подготовке образцов для исследования почвы просеивали через сита, отделяя фракцию 4.5–5 мм.

В ходе измерения агрегаты помещали в кассету, представляющую собой 3 пары алюминиевых уголков, закрепленных таким образом, чтобы угол был ориентирован по направлению действия силы тяжести. В нижней части уголка были размещены фитили из хлопчатобумажной ткани.

В алюминиевые уголки на фитили укладывали по 14 почвенных агрегатов так, чтобы они касались друг друга. Посредством вакуумирования удаляли из агрегатов воздух в течение 15 мин при разрежении 15 кПа.

После удаления воздуха из агрегатов кассету перемещали в эксикаторе так, чтобы фитили пришли в контакт с водой, и агрегаты в вакууме через фитили капиллярно увлажнялись до значений, близких к насыщению. Ввиду неодинаковой смачиваемости агрегатов различных почвенных типов, для каждого из них время капиллярного увлажнения подбирали индивидуально. Так, например, для образцов черноземов время увлажнения составило 30 мин, для серой лесной и дерново-подзолистой почв – 15 мин.

После увлажнения агрегатов в вакууме кассету извлекали из эксикатора и помещали в расположенную на весах емкость с водой таким образом, чтобы фитили под агрегатами обеспечивали сохранение насыщения их водой, достигнутое на этапе вакуумирования.

Затем на линейно расположенные агрегаты помещали устройство, представляющее собой два параллельно расположенных лезвия, закрепленные на площадке, на которую устанавливали стаканчик с мерной шкалой. Добавляя песок в стаканчик, повышали нагрузку на агрегаты, которую фиксировали при помощи весов.

С целью стандартизации получаемых данных рассчитывали предельное сопротивление разрушения агрегатов. Экспериментально определяемую нагрузку в граммах выражали в миллиньютонах (мН) на агрегат.

Отметим, что коэффициент корреляции между значениями устойчивости водонасыщенных агрегатов, полученных с помощью метода “лезвий”, и водоустойчивостью по методу мокрого просеивания составляет свыше 85% [12], что позволяет использовать метод лезвий не только для оценки механической прочности агрегатов, но также их водоустойчивости.

При изучении влияния температуры на водоустойчивость почвенной структуры помещали кассету с образцами (после вакуумирования и капиллярного увлажнения агрегатов) под инфракрасную лампу для их нагревания или в холодильник для охлаждения. Предотвращение высыхания агрегатов достигали путем поддержания их капиллярного контакта с водой через фитили. Измерение водоустойчивости проводили одновременно с определением температуры.

На первом этапе исследования изучали почвенные образцы, не подвергавшиеся высушиванию до воздушно-сухого состояния. Было установлено (рис. 1–3), что водоустойчивость агрегатов исходных образцов всех типов почв повышалась с ростом температуры. При остывании агрегатов до комнатной температуры их водоустойчивость снижалась до начальных значений. В ходе измерения водоустойчивости почвенных агрегатов при пониженных температурах ее значения уменьшались. Эти результаты подтвердили предположение о том, что в основе механизма водоустойчивости почв, не подвергавшихся высушиванию, лежат гидрофобные связи.

На втором этапе работы определяли влияние температуры на водоустойчивость агрегатов, которые были предварительно высушены до воздушно-сухого состояния[1]. Хорошо видно, что данное свойство для всех изученных почв не соответствовало результатам, полученным для исходных почв (ни на количественном, ни даже на качественном уровне) – водоустойчивость оставалась практически неизменной (рис. 4).

[1] Согласно требованиям ГОСТ 58595-2019. Почвы. Отбор проб.

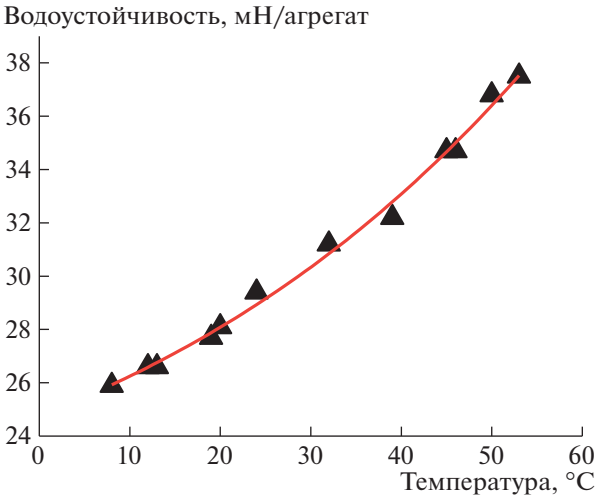

Рис. 1. Влияние температуры на водоустойчивость агрегатов чернозема выщелоченного.

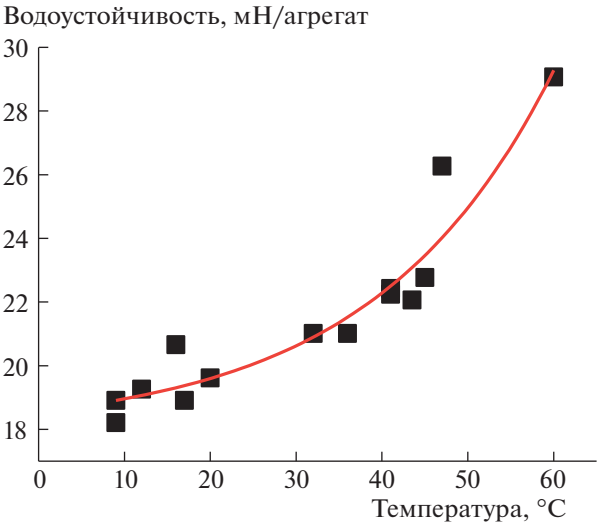

Рис. 2. Влияние температуры на водоустойчивость агрегатов дерново-подзолистой почвы.

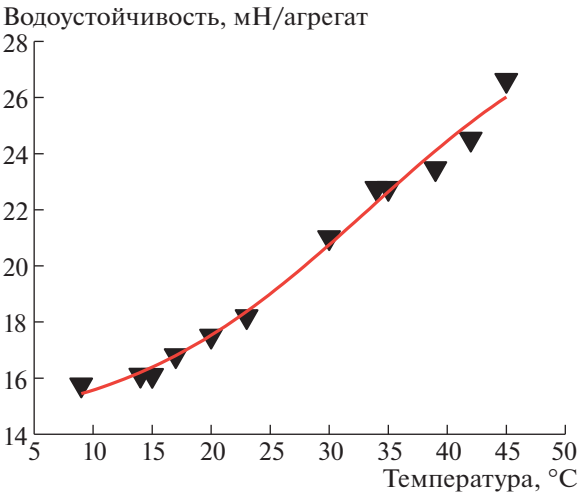

Рис. 3. Влияние температуры на водоустойчивость агрегатов серой лесной почвы.

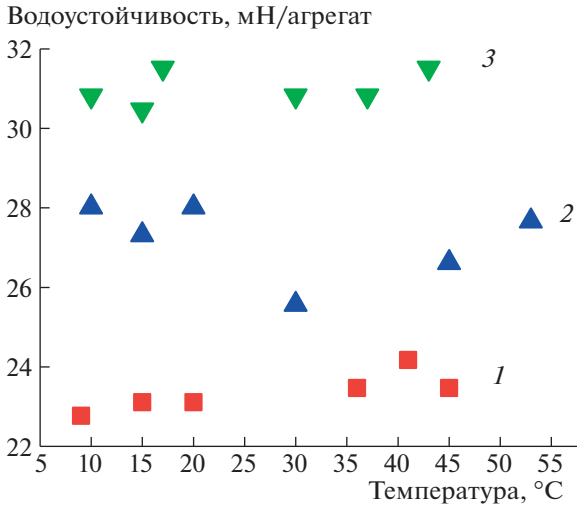

Рис. 4. Влияние температуры на водоустойчивость высушенных агрегатов разных тип почв (1 – дерново-подзолистой почвы, 2 – серой лесной почвы, 3 – чернозема).

Принимая во внимание, что прочность гидрофобных связей при повышении температуры растет, а гидрофильных связей снижается, полученные данные о неизменности величин водоустойчивости можно объяснить, если предположить совместное участие в водоустойчивости образцов почв, прошедших через стадию высушивания до воздушно-сухого состояния, как гидрофобных, так и гидрофильных связей. Фактически эти результаты свидетельствуют о сильном изменении структурной организации почв при высушивании и некорректности использования образцов, прошедших через стадию высушивания, для определения водоустойчивости почв.

При анализе литературы мы отмечали выше, что водоустойчивость почв, с одной стороны, определяется гидрофобными связями, а с другой стороны, в литературе показано [13, 14], что важную роль имеют лабильные (гидрофильные) компоненты гумуса. Отрицать корректность полученных данных нет никаких оснований. Поэтому можно утверждать, что для повышения водоустойчивости необходимо существование в почве гидрофобных и гидрофильных соединений гуминовых веществ, обеспечивающих наличие в почве связей обоих типов.

Объяснение этому может быть дано на основе описанного в работе [15] механизма водоустойчи-

вости, состоящего в образовании гидрофобных связей между надмолекулярными образованиями из гуминовых веществ – фрактальными кластерами (Ф-кластерами), имеющими дендритную структуру. Прочность связи между двумя Ф-кластерами определяется количеством гидрофобных связей между ними: чем больше связей, тем выше устойчивость. Прочные связи между Ф-кластерами могут возникнуть, если они будут взаимодействовать между собой не через точечные гидрофобные контакты на поверхности отдельных "ветвей", а через множество гидрофобных контактов, возникающих при сцеплении нескольких "ветвей". Такое взаимодействие возможно только при наличии гидрофильных участков с ионными атмосферами, выполняющими функцию протекторов. Они, подобно одноименно заряженным магнитам, отталкивают "ветви" Ф-кластеров друг от друга, тем самым создавая "коридор", обеспечивающий более глубокое взаимопроникновение этих "ветвей". В результате вместо одиночных гидрофобных контактов между отдельными "ветвями" Ф-кластеров между ними возникают множественные гидрофобные контакты, значительно повышающие водоустойчивость. В противном случае взаимодействие между Ф-кластерами будет происходить через небольшое число точек на их поверхности, что не может обеспечить высокую водоустойчивость почв.

ВЫВОДЫ

1. Обнаружено увеличение водоустойчивости почвенных агрегатов с ростом температуры для образцов, не подвергавшихся высушиванию. Это говорит о ведущей роли гидрофобных связей, так как при повышении температуры их энергия также возрастает.

2. На почвенных образцах, проходивших стадию высушивания до воздушно-сухого состояния, не обнаружено влияния температуры на водоустойчивость. Для объяснения этих результатов выдвинуто предположение, что при высушивании образцов почв гидрофобные и гидрофильные связи действуют разнонаправленно. При этом по суммарной энергии эти связи оказываются равны, поэтому начинают уравновешивать друг друга и значение водоустойчивости остается неизменным.

3. Полученные результаты свидетельствуют о сильном изменении структурной организации почвенных образцов при высушивании и некорректности определения водоустойчивости на этих образцах.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках темы государственного задания МГУ № 122011800459-3.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Lamichhane J.R., Debaeke P., Steinberg C., You M.P., Barbetti M.J., Aubertot, J.N.* Abiotic and biotic factors affecting crop seed germination and seedling emergence: a conceptual framework // Plant and soil. 2018. V. 432. P. 1–28.
2. *Haydu-Houdeshella C-A., Grahamb R.C., Hendrixc P.F., Petersonc A.C.* Soil aggregate stability under chaparral species in southern California // Geoderma. 2018. V. 320. P. 201–208.
3. *Mao J., Nierop K.G.J., Dekker S.C., Dekker L.W., Chen B.* Understanding the mechanisms of soil water repellency from nanoscale to ecosystem scale: a review // Journal of Soils and Sediments. 2019. V. 19. P. 171–185.
4. *Николаева Е.И.* Устойчивость почвенных агрегатов к водным и механическим воздействиям. Дисс. канд. биол. наук. М.: МГУ, 2016. 104 с.
5. *Verchot L.V., Dutaur L., Shepherd K.D., Albrecht A.* Organic matter stabilization in soil aggregates: Understanding the biogeochemical mechanisms that determine the fate of carbon inputs in soils // Geoderma. 2011. V. 161 (3–4). P. 182–193.
6. *Vogelmann E.S., Reichert J.M., Prevedello J., Awe G.O., Mataix-Solera J.* Can occurrence of soil hydrophobicity promote the increase of aggregates stability? // Catena. 2013. V. 110. P. 24–31.
7. *Милановский Е.Ю.* Гумусовые вещества почв как природные гидрофобно-гидрофильные соединения // ГЕОС. 2009. 186 с.
8. *Шеин Е.В., Милановский Е.Ю.* Роль и значение органического вещества в образовании и устойчивости почвенных агрегатов // Почвоведение. 2003. № 1. С. 53–61.
9. *Шинкарев А.А., Мельников Л.В., Зайнуллин Т.Е.* Природа водопрочности агрегатов гумусовых горизонтов темно-серой лесной почвы // Почвоведение. 1999. № 3. С. 348–353.
10. *Шинкарев А.А., Перепелкина Е.Б.* Содержание и состав гумусовых веществ в водопрочных агрегатах темно-серой лесной почвы // Почвоведение. 1997. № 2. С. 165–172.
11. *Rowley M.C., Grand S., Verrecchia É.P.* Calcium-mediated stabilisation of soil organic carbon // Biogeochemistry. 2018. V. 137. № 1–2. P. 27–49.
12. *Ушкова Д.А., Конкина У.А., Горепекин И.В., Потапов Д.И., Шеин Е.В., Федотов Г.Н.* Устойчивость агрегатов пахотных почв: экспериментальное определение и нормативная характеристика // Почвоведение. 2023. № 2. С. 203–210.
13. *Когут Б.М.* Трансформация гумусового состояния черноземов при их сельскохозяйственном использовании // Почвоведение. 1998. № 7. С. 794–802.
14. *Когут Б.М.* Принципы и методы оценки содержания трансформируемого органического вещества в пахотных почвах // Почвоведение. 2003. № 3. С. 308–316.
15. *Шоба С.А., Шеин Е.В., Ушкова Д.А, Грачева Т.А., Салимгареева О.А., Федотов Г.Н.* Физико-химические аспекты водоустойчивости почв // Доклады Академии Наук. Науки о Земле. 2023. Т. 508. № 1. С. 139–143.

THE NARURE OF BONDS IN THE FORMATION OF WATER STABILITY OF SOIL AGGREGATES

G. N. Fedotov[a,#], Corresponding Member of the RAS S. A. Shoba[a], D. A. Ushkova[a], I. V. Gorepekin[a], and A. P. Shvarov[a]

[a] *Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation*

[#] *E-mail: gennadiy.fedotov@gmail.com*

There is an opinion that water stability is provided by hydrophobic bonds between organic soil particles, however, there are works in which the main role in the occurrence of this property is assigned to the presence of hydrophilic organic substances in soils. The aim of the study was to clarify the nature of the bonds (hydrophilic or hydrophobic) that ensure the water stability of soils. The work used samples of sod-podzolic and gray forest soil, as well as leached chernozem. Experiments on the assessment of water stability were carried out by the method of "blades". It is based on the dissection of linearly arranged aggregates, which were previously moistened in vacuum to values close to saturation. The energy of hydrophobic bonds depends on temperature, so the effect of temperature on the determined value of water stability was studied. Experiments have shown that with an increase in temperature, the water stability of aggregates stored in a wet state from the moment of selection increased, and with a decrease, it fell. This indicates the leading role of hydrophobic bonds in the formation of water stability. For samples dried to an air-dry state, moistened again and kept in a wet state for more than 2 weeks, no temperature dependence of water stability was found. Taking into account that the strength of hydrophobic bonds increases with increasing temperature, and hydrophilic bonds decreases, the data obtained on the immutability of water stability values can be explained if we assume the joint participation of both hydrophobic and hydrophilic bonds in the water stability of soil samples that have passed through the stage of drying to an air-dry state. In fact, these results indicate a strong change in the structural organization of soils during drying.

Keywords: water stability and organic matter of soils, hydrophilic and hydrophobic bonds, the effect of temperature on water stability